

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105779

内燃动车组线缆 EMC 仿真与防护设计

徐艺峰¹ 李常贤² 路文连¹

(1.大连交通大学电气信息工程学院 大连 116021; 2.大连交通大学轨道交通装备国家地方联合工程研究中心 大连 116021)

摘要: 内燃动车组车下线缆众多、布线空间狭长,容易发生线间串扰故障。通过介绍车下布线情况,结合串扰理论,设计了一种降低线缆间串扰的屏蔽防护方案。在 CST 线缆工作室中对 M 车和 T 车下两种不同工况下建立线缆仿真模型,得出传感器线缆中的串扰电流、电压。通过仿真波形对比,加装屏蔽后的电流、电压相比未加屏蔽之前的串扰大幅降低,符合设备正常工作的误差范围内,验证了方案的有效性。同时对其他型号电力机车的布局布线有一定的工程参考价值。

关键词: 内燃动车组;串扰;屏蔽;布局布线;电磁兼容

中图分类号: U228.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

EMC simulation and protection design of internal combustion EMU cable

Xu Yifeng¹ Li Changxian² Lu Wenlian¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116021, China;

2. National and Local Joint Engineering Research Center for Rail Transit Equipment, Dalian Jiaotong University, Dalian 116021, China)

Abstract: Interwire crosstalk is easy to occur due to numerous cables and long and narrow wiring space of EMU. By introducing the wiring situation under the vehicle and combining with the theory of crosstalk, a shielding protection scheme to reduce the crosstalk between cables is designed. In the CST cable studio, the cable simulation model was established under two different working conditions of M car and T car, and the crosstalk current and voltage in the sensor cable were obtained. Through simulation waveform comparison, the current and voltage after the installation of shielding are significantly reduced compared with the crosstalk before the installation of shielding, which conforms to the error range of the normal operation of the equipment, and verifies the effectiveness of the scheme. At the same time, it has certain engineering reference value to the layout and wiring of other types of electric locomotives.

Keywords: internal combustion EMU; crosstalk; shielding; the layout of the wiring; electromagnetic compatibility

0 引言

内燃动车组是一个集高压设备、变频设备、网络通信、信号设备于一体的复杂设备^[1]。其车下设备之间连接线缆铺设紧密,线间串扰问题频频发生,针对线间串扰问题许多学者做过研究^[2-12],研究表明受扰线中串扰的大小只与干扰线中电压、电流的大小,线间距离和两者并行走线长度有关。文献[2]提出了一种传输线抗干扰的优化方法,但在实际工程中实现难度较大;文献[4]、[7]只研究了线缆长度、间距等自身参数对于串扰的影响,在实际工程中可能由于条件受限无法通过改变这些参数来降低串扰;文献[5]、[8]对比了几种设备线缆的抗干扰度,但未构建线缆模型,对比效果不够直观;文献[11]提出了一种屏蔽防护使得测试电流误差率的方法,但效果不是特别明显;文献[13]对比了几种线缆的抗干扰能力,但未明确激励源的大小;文献[14-15]各

提出了一种不同对象的屏蔽防护整改方案,但文献[14]未对屏蔽整改前后仿真波形进行叠加对比,对比效果不明显,文献[15]没有构建模型并进行仿真对比分析,不具有说服力。

本文为了抑制传感器中串扰,根据实际工程背景需求运用传输线理论构建了线缆串扰仿真模型,制作了模拟实际工况的激励。通过对比屏蔽防护前后传感器信号波形,大幅降低了串扰,符合传感器线中电压、电流允许误差范围内的波动区间,验证了仿真的有效性,具有一定的工程参考价值。

1 电磁干扰源分析

1.1 牵引系统构成

内燃动车组的牵引系统由主发电机、变流器、牵引电机及制动电阻构成,其中主发电机发出的交流电经整流模块

收稿日期:2021-02-02

整流后将直流电源提供给逆变模块,逆变模块将中间直流电源逆变为电压和频率可变的三相交流电源,驱动对应的牵引电机运行,并利用斩波模块和制动电阻进行制动,如图 1 所示。

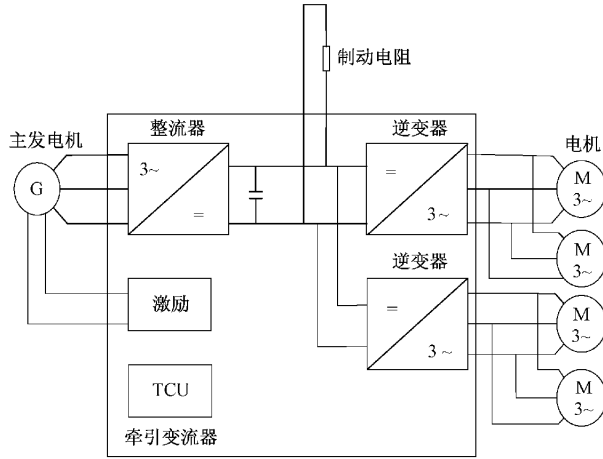


图 1 牵引系统电路

1.2 牵引系统干扰源分析

内燃动车组的动车车下中间部位有动力单元,动车车下从左端到右端的走线,经过动力单元区域时,车下所有线缆都是经过车下“梯子”的同一侧走线,如图 2 所示。其中牵引变流器会外拖出 22 根线缆为拖车的辅助变流器、跨接连接器等设备供电,各个线缆的工作频率、幅值等差异很大,而由于车辆配重原因,内燃动车组车下只能采用无任何屏蔽效果形似“梯子”的绑线架固定线缆,没有设计具有屏蔽防护效果的线槽,当动力线与信号线固定距离过近时,就容易发生线缆串扰故障,因此判定牵引变流系统主要的干扰源是牵引变流器及其外拖出的动力电缆。

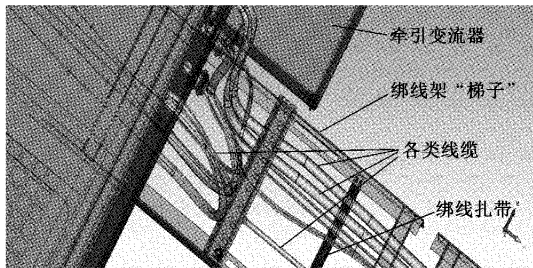


图 2 车下走线情况

牵引变流器及其外拖出的动力线缆对传输弱电信号线缆的串扰,容易引起信号线中传输的电信号畸变失真,导致终端传感器设备误动作或失效,所以针对以上问题,本文采用车上实际使用的线缆参数,进行串扰仿真分析与防护设计。

由于 IGBT 高速开通和关断会在变流器输出侧产生共模电压,其对电路中的寄生电容进行充放电,便会在变流器输出侧的电机线缆上产生较大的共模电流,产生了一个电

磁辐射源,如果敏感数据线离其较近,便会通过线缆上的分布电容与互电感耦合进敏感数据线造成干扰,严重时会影响数据线的正常工作。

1) 功率模块 EMC 特性分析

牵引变流器中的功率器件,其快速的开关动作能够引起很大的 dv/dt 和 di/dt ,它们同存在于电路中的寄生电容和寄生电感发生作用。IGBT 有很高的尖峰脉冲电压,电压频谱分量从 120 Hz~1 GHz 左右,对于 1 nF 的寄生电容,即可产生几到十几个安培的脉冲电流。对于牵引变流器来说,散热器和功率模块之间的寄生电容为高频辐射提供了意外通道; di/dt 则通过对电路中存在的杂散电感感应出电压。

功率模块内部开关器件产生的电磁干扰也会通过线缆中的分布电容、分布电感产生 EMI 干扰通过传导进入牵引变流器外拖线缆中。

2) 变流器外拖动力线缆产生的辐射发射

动力线缆内的干扰信号包括差模和共模干扰。共模和差模电流都是由导线传导后在导体上由天线效应向外产生辐射发射,进而将干扰信号耦合进受扰线。共模电流的环路是由线缆与参考地构成的,具有较大的环路面积,在导线之间存在较大的分布电容和互电感,所以会对周围产生较强的辐射,导致导线之间产成信号串扰。差模电流一般来说整个环路面积很小,所产生的辐射较小。因此外拖动力线缆的辐射主要来自共模辐射。牵引变流器外拖线缆的共模辐射强度计算公式如下:

近场区内:

$$E = 1.430IL/fD^3 \tag{1}$$

远场区内:

$$E = 1.26ILf/D \tag{2}$$

式中: I 对应电缆中的共模电流(μA); L 对应电缆长度(m); D 对应观测点到电缆的距离(m); f 对应共模电流的频率(MHz)。

2 线缆串扰分析

针对动力线缆与信号线建立平行双线串扰模型,由两根平行于地面的单线组成,原理如图 3 所示。

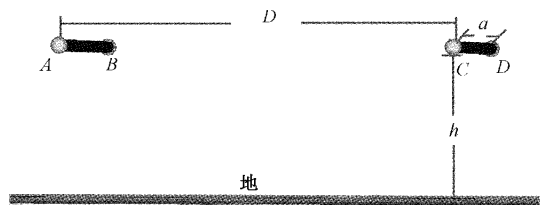


图 3 平行双线原理

单线直径为 d ,线间距为 D ,距离地面高度为 h ,长度为 a 。等效电路如图 4 所示。

在低频时,根据传输线理论,单线的电感 L (单位 μH)为^[8]:

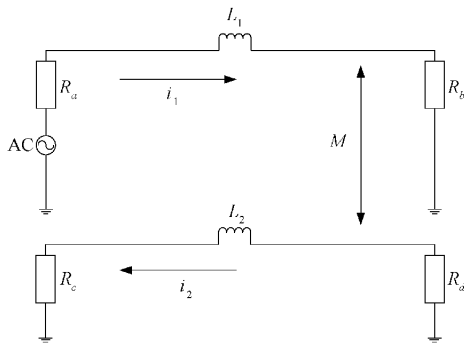


图 4 平行双线等效电路

$$L = 0.141 \lg \left(\frac{4h}{d} \right) \quad (3)$$

两根单线间的互电感 M (单位 μH) 为:

$$M = 0.071 \lg \left[1 + \left(\frac{2h}{D} \right)^2 \right] \quad (4)$$

因此,干扰线上的电流 i_1 (单位 A) 为:

$$i_1 = \frac{1}{R_a + R_b + j\omega L_1} \quad (5)$$

其中, $\omega = 2\pi f$, f 为电压源频率, 单位 MHz。 R_a 为电源端口的阻抗, R_b, R_c, R_d 为电路阻抗。

受扰线上的电流为 i_2 (单位 A) 为:

$$i_2 = \frac{j\omega M i_1}{R_c + R_d + j\omega L_2} \quad (6)$$

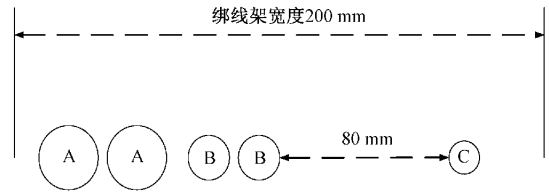
由此可见受扰线上存在耦合电流, 会对受扰线中原有的信号造成干扰。

3 模型构建及仿真

根据内燃动车组车下实际绑线架进行 1:1 搭建 3D 模

型, 而且根据电气原理图中的走线路径进行线缆布线。

根据车下布线情况如图 5 所示, 重点分析车下电磁兼容环境对于温度传感器线以及速度传感器线的干扰以及防护效果对比。



A: 牵引变流器—牵引电机 AC550V 动力线缆
B: 制动电阻—牵引变流器 DC850V 动力线缆
C: 牵引电机温度绕组传感器线缆

图 5 布线示意图

由于仿真分析需完成于车辆布线工作之前且车下线缆众多走线方式复杂, 所以线缆走线路径、线缆实际间距、线缆规格等仿真参数通过查阅该车辆电气原理图, 整理后使用 CAD 等绘图工具画图, 便于后期在仿真中布局布线使用。

根据电气原理图整理后得出实际车下布线路径中与牵引电机温度传感器线并行走线的动力线缆分别有制动电阻到牵引变流器 DC850V 高压线缆、主发电机到牵引变流器 AC650V 动力线缆、牵引变流器到牵引电机 AC550V 动力线缆。

与 T 车速度传感器线缆并行走线的只有牵引变流器到 T 车辅助变流器的 DC750V 线缆。

3.1 线缆物理结构建模

线缆物理结构方面根据实际使用线缆型号、线径进行建模, 各类线缆剖面结构如图 6 所示。

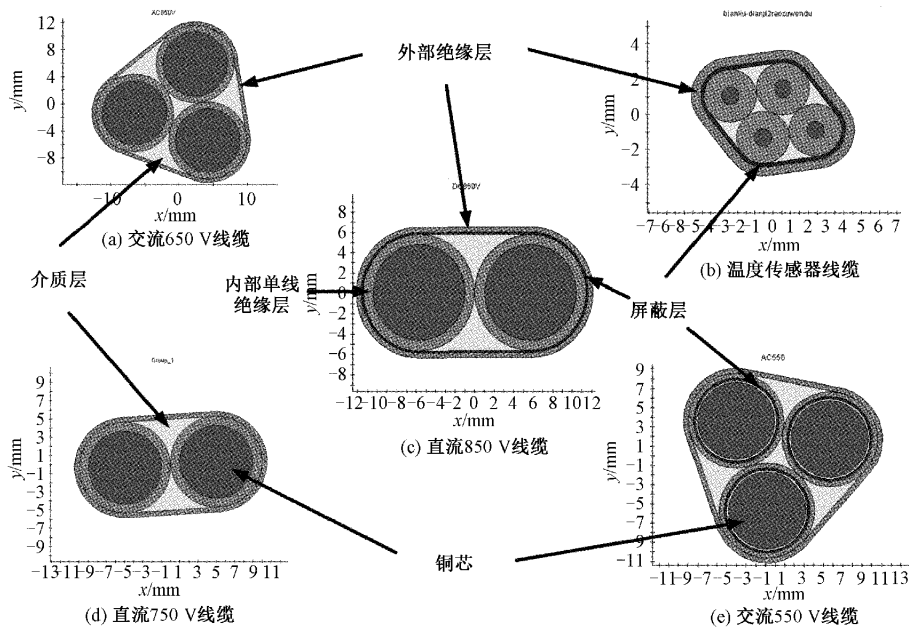


图 6 线缆剖面结构

3.2 激励设置

由于在仿真时,为了模拟实际的电压。在动力线缆的电压上分别添加总占比为 20% 的谐波;脉冲重复频率为 10 kHz 的电快速脉冲群;开路输出电压峰值 20 V 的浪涌干扰;峰值为 14 V,频率为 5 MHz 的高频正弦波。

电压为 DC750V 与上述干扰叠加之后的波形如图 7 所示。

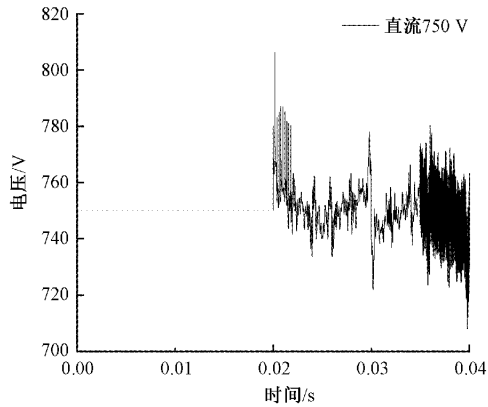


图 7 直流 750 V 信号叠加波形图

电压为 DC850V 与上述干扰叠加之后的波形如图 8 所示。

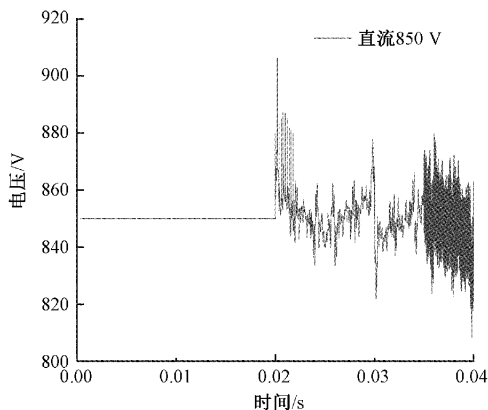


图 8 直流 850 V 信号叠加波形图

电压为 AC550V 三相电,频率为 200 Hz 与上述干扰叠加之后的波形如图 9 所示。

电压为 AC650V 三相电,频率为 90 Hz 与上述干扰叠加之后的波形如图 10 所示。

3.3 仿真结果分析

1) 动力线缆对牵引变流器到牵引电机温度传感器线缆输出信号的影响

温度传感器线缆激励信号采用 4 mA 的恒流源,选取温度为 60 °C 时对应的电阻值 123.24 Ω,根据欧姆定律,其两端电压值为 0.493 V,通过添加探针的方式探测其两端的电压,将仿真出的电压值利用欧姆定律进行计算,根据温度传感器的允许误差等级,在 60 °C 时,允许误差为 ±1.3

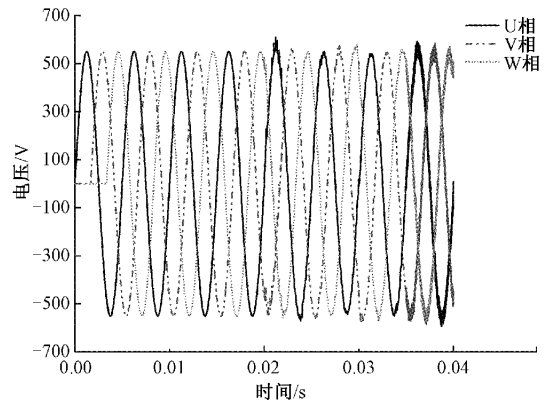


图 9 交流 550 V 信号叠加波形图

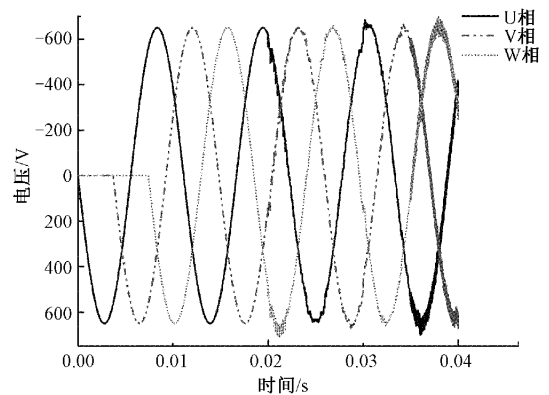


图 10 交流 650 V 信号叠加波形图

°C,即在 58.7 °C ~ 61.3 °C 之间,如果超出这个范围,则认为动力线缆对其产生的辐射干扰不可忽略。

电机温度传感器线缆正常工作电流值为 4 mA,激励输入信号如图 11 所示。

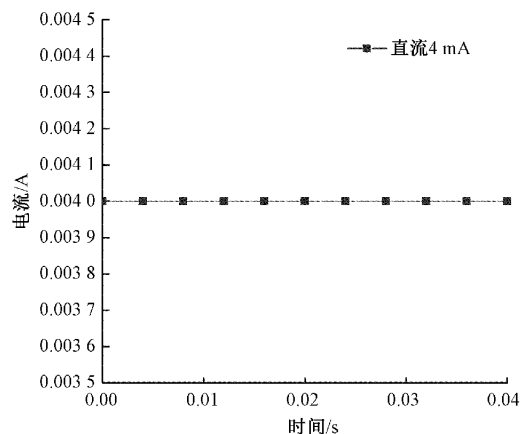


图 11 牵引电机温度传感器线缆输入波形

牵引电机温度传感器输出端仿真结果如图 12 所示。

由图 12 仿真结果可以看出,当所有动力线缆和牵引电机温度传感器线缆不加屏蔽编织网防护时,动力线对牵引电机温度传感器线缆输出信号的干扰电流最大值为 4.009 mA,最

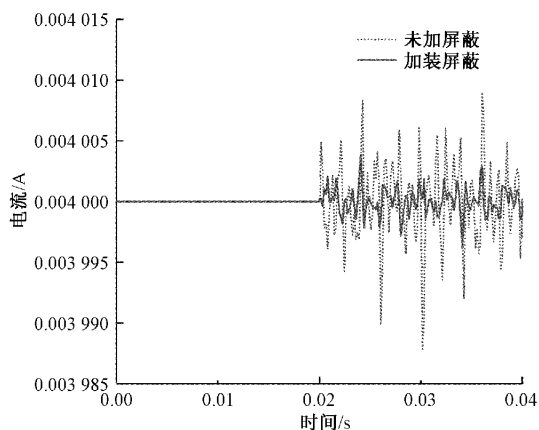


图 12 牵引电机温度传感器线缆输出波形

小值为 3.988 mA。当所有动力线缆和牵引电机温度传感器线缆均加屏蔽编织网的情况下,动力线对牵引电机温度传感器线缆输出信号的干扰电流最大值为 4.004 mA,最小值为 3.996 mA。即由于干扰造成的温度传感器产生的温度误差在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,符合牵引电机温度传感器的性能要求,能够正常工作。由于加入了 5 MHz 高频干扰成分,可以看出屏蔽编织网对高频部分的抑制作用较为明显。对低频谐波也有一定抑制作用。

2) DC750V 动力线缆对 T 车速度传感器输出信号的影响

利用 CST 仿真软件,在 T 车速度传感器线缆输入端添加如图 13 所示波形。

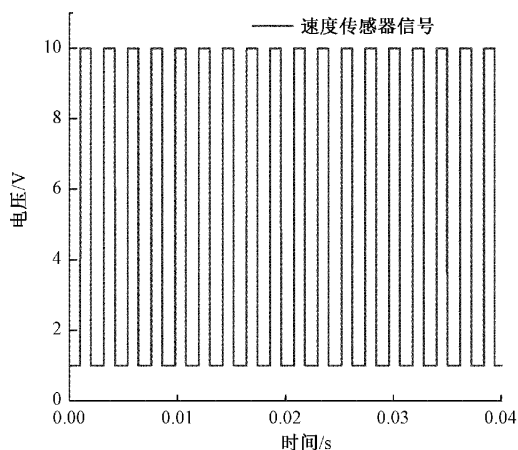


图 13 T 车速度传感器线缆输入波形

T 车速度传感器输出端仿真结果如图 14 所示。

由图 14 仿真结果可以得出以下结论:当牵引变流器到 T 车辅助变流器的 DC750V 线缆和 T 车速度传感器线缆均不采用屏蔽编织网时,造成串扰电压最大值为 12.96 V,此时速度传感器不能正常工作。当牵引变流器到 T 车辅助变流器的 DC750V 线缆和 T 车速度传感器线缆均采用屏蔽编织网防护时,能够很好地抑制浪涌、脉冲群、高频信号的影响,对低频谐波也有一定的抑制作用。

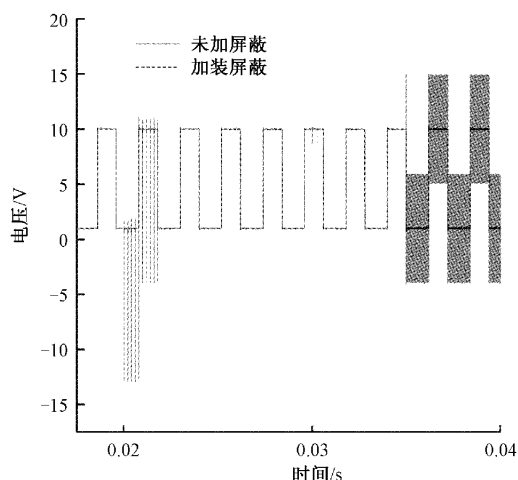


图 14 T 车速度传感器线缆输出波形对比图

根据以上结论,在车辆上整改实物如图 15 所示。

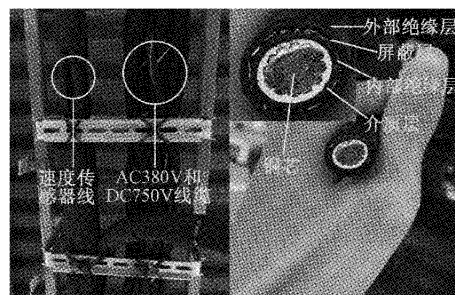


图 15 车下线架布线实物

4 结 论

线缆屏蔽防护在轨道交通、电气设备已被广泛应用,在内燃动车组的布线设计中,发现了车下布线间距有限,不能符合中国铁路标准中的最小布线间距,因此必须对线缆间串扰建立模型进行仿真研究,以此有针对性地进行线缆屏蔽防护设计。

本文利用传输线理论建立了双线串扰模型进行了公式计算,并在 CST 线缆工作室中建立了 1:1 的内燃动车组车下线缆模型。

仿真结果表明在采取屏蔽防护措施后信号线中的电流、电压扰动明显小于采取屏蔽防护之前的电流、电压扰动,在温度传感器的仿真中,通过计算采取屏蔽防护后的电流扰动处于允许的扰动范围内,使得温度传感器的误差范围抑制在了 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 内,而且在温度传感器的仿真中,速度传感器线中的电压扰动减小了 13.58 V,均符合设备正常工作的误差范围内。

因此在内燃动车组实际布线过程中,M 车上所有动力线缆以及温度传感器线需使用带有屏蔽层的线缆,并且保证两者间间距大于 100 mm 以上。T 车上 DC750V 线缆与速度传感器信号线均需使用带有屏蔽层的线缆。

综上所述,内燃动车组在布线时应采取合适的线缆屏蔽防护措施,以达到电磁兼容性设计的要求,本文研究结果已应用于出口安哥拉的内燃动车组,对其他电力机车的布局布线具有一定的工程参考价值。

参考文献

- [1] 谢华君. 内燃机车线缆的电磁兼容仿真分析[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [2] 刘瑞华,商鹏,梁欣萌. 北斗机载接收机传导敏感度测试[J]. 电子测量技术,2019,42(3):68-73.
- [3] 段腾飞. 平行线缆间串扰的仿真研究[J]. 电子质量,2019(11):103-105.
- [4] 时吉,雷虹,石鑫. 线缆串扰分析研究[J]. 飞机设计,2019,39(1):58-61.
- [5] 黄羿场,贾云峰,于洋. 基于直升机蒙皮等效的电磁屏蔽效能测试研究[J]. 电子测量技术,2019,42(13):21-25.
- [6] 马云双,闻映红,张丹,等. 动车组屏蔽线缆间串扰特性及其试验验证研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(5):1188-1194.
- [7] 王忠福. 增程式电动汽车多线束串扰研究[D]. 吉林:吉林大学,2018.
- [8] 张春龙,行鸿彦,李春影,等. 不同类型电缆耦合雷电感应过电压研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(6):180-185.
- [9] 鲁文帅,尤睿,周扬,等. 基于单片 TMR 磁传感器的非侵入电流监测微系统[J]. 仪器仪表学报,2020,41(6):1-9.
- [10] 张金玉,季鑫源,何贵先,等. 风电机组多重雷击暂态过电压分析[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(3):153-160.
- [11] 陈昌鑫,郭文超,冉召会,等. 罗氏线圈与隧道磁阻复合的电流测试方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(8):151-158.
- [12] 巢峻,刘芸. 高兼容性 VPX 背板设计与仿真测试[J]. 电子测量技术,2020,43(17):17-20.
- [13] 赵玉研,张业荣. 常见线缆线束之间的串扰仿真研究[J]. 通讯世界,2019,26(3):108-109.
- [14] 岳元,柴云峰,祁蒙,等. 光电搜索设备 CE102 和 RE102 电磁兼容整改研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(10):130-133.
- [15] 刘勇,吴阳勇,白惠文,等. 一种用于高度表原位测试的天线信号耦合器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2019,38(12):82-85.

作者简介

徐艺峰,硕士研究生,主要研究方向为轨道列车电磁兼容设计技术。

E-mail:295812180@qq.com

李常贤,博士,教授,主要研究方向为轨道列车电磁兼容技术、列车网络控制。

E-mail:lichangxianzju@163.com

路文连,硕士研究生,主要研究方向为电磁兼容设计技术。

E-mail:1132164990@qq.com